

(103) 遠心力場におけるケーソン式護岸の振動実験

運輸省港湾技術研究所 ○稲富隆昌

〃 風間基樹

〃 村上幸博

1. まえがき

港湾構造物のひとつにケーソン式護岸がある。ケーソン式護岸の地震時の水平方向の安定性は、ケーソンに作用する慣性力、地震時土圧およびケーソンの底面摩擦力の3者の大きさによって決定される。震度法に基づく耐震設計法では、ケーソンの大きさは、慣性力と地震時土圧の合力が底面摩擦力より小さくなるように設計される。一方、ケーソン・地盤全体系の模型振動実験¹⁾によると、ケーソンの慣性力と振動時の動的土圧は、逆位相の関係にあることが多く、動的土圧がケーソンの安定にとって必ずしも危険な土圧とならない。すなわち、慣性力が海側を向いているときの動的土圧の向きは陸側に向いており、振動時のケーソンに作用する力は、慣性力および振動前の静的土圧から動的土圧を差し引いた土圧で、この外力が底面摩擦力と釣り合っていることになる。このようにケーソン・地盤全体系としてケーソンに作用する慣性力と動的土圧の関係を検討すると、現行設計法の考え方と異なることが指摘されている。

上記の動的土圧の特性は、1 Gの重力場で実施された模型振動実験によって明らかにされたが、今回、実物と同じ応力状態を再現できる遠心力場でも同様な実験を実施し、動的土圧の特性等を検討した。本報告は、その実験結果を取りまとめたものである。

2. 実験方法

振動実験は、当研究所の遠心力载荷装置を用いて実施した。遠心力载荷装置の主な仕様は、遠心加速度が110～155 G、有効半径が3.8 m、スウィングプラットフォームの大きさが1.6×1.6 m、最大搭載重量が2.7 tなどである。また、加振に用いた装置は、加振力約50 kNの油圧式振動台²⁾である。振動台のテーブルの大きさは70×35 cmで、この上に振動箱やせん断リング土槽などを搭載する。振動台は制御室からRS232Cインターフェースを介して、パーソナルコンピュータによって制御され、種々の加振条件を設定することができる。入力波形としての正弦波や地震波は32 kワードのROMに書き込まれており、ROMのアドレスを指定することにより所定の波形を任意に読み出すことができる。

加速度、変位などの実験データは、プラットフォームに搭載した動ひずみアンプ及びスリップリングを通してアナログ信号として計測している。アナログデータは、実験後にAD変換し、数字化している。また、ケーソン、地盤の変形を記録する最高3000コマ/秒撮影可能な高速度カメラもプラットフォームに設置されている。

図-1は、ケーソン・地盤系の模型断面である。模型は、内寸法が長さ60×高さ41×幅18 cmの振動箱に製作されている。ケーソンには、3個の荷重計で土圧計測用の受圧板が取り付けられている。したがって、ケーソンに作用する静的、動的土圧は、土圧合力として荷重計によって計測している。荷重計は受圧板の慣性力も計測しているため、受圧板の慣性力は解析時に計測荷重から除去している。地盤は秋田港で採取された砂で、気乾状態で製作した。ケーソンは

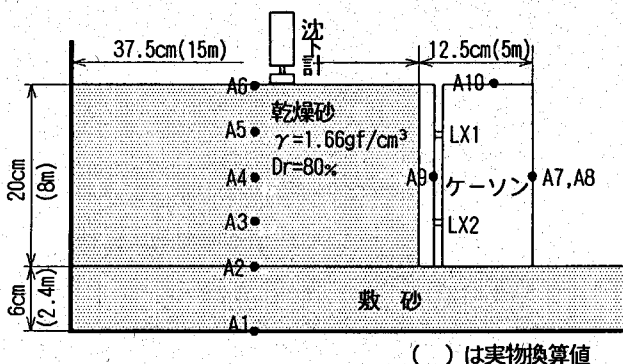


図-1 ケーソン・地盤系の模型断面

高さが20cmのアルミ板製の箱である。砂層の単位体積重量は 1.66gf/cm^3 、相対密度は80%であった。振動実験は40Gの遠心力場で実施した。A1～A10は加速度計、LX1とLX2は荷重計を表す。また、ケーソンの変形は振動箱のガラス側壁を通して高速度カメラによって記録した。なお、1秒間の撮影コマ数は1000コマとした。図-2は、プラットフォームに搭載したアクチュエータを含む振動台、アキュムレータ（通常使用圧力： 210kgf/cm^2 ）を含む油圧動力源、高速度カメラ装置等の配置図である。これら装置の制御装置は、カウンターバランス用のプラットフォームに搭載されている。振動実験に用いた入力波形は1968年十勝沖地震の際、八戸港で観測された地震波を基盤へ戻した地震波である。実験ケースは、最大加速度が実物換算値で約78、213、366、389Gal（ケース1～4）の4ケースである。図-3はケース1の振動台で計測された入力加速度波形である。同波形の周波数分析によると、200Hz（実物

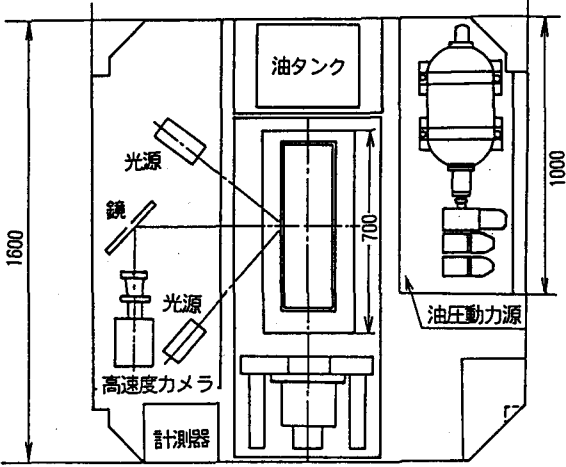


図-2 振動実験装置配置平面図

で5Hz)以上の高振動数成分は少なかった。なお、以下本報告で示す加速度、振動数は実物換算値で示すが、換算に用いる遠心力場の模型振動実験の相似則は、文献3)に従った。

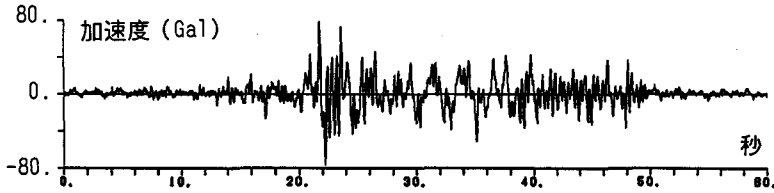


図-3 加速度入力波形（ケース1：実物換算値）

3. 実験結果

表-1は、各加振段階前にケーソンに作用していた静的土圧係数と背後地盤の沈下量をまとめたものである。土圧係数は、土圧分布が三角形分布であると仮定し、土圧合力から算定して求めた。静的土圧係数は、入力加速度の増加とともに大きくなっており、背後地盤は加振により沈下した。この土圧係数から、壁面摩擦角 15° として逆算される砂の内部摩擦角 ϕ は、 43.5° から 40° であった。また、実験前と実験後の計測によると、加振実験によりケーソンは、合計2.5mm（実物で10cm）滑動変形した。更に、高速度カメラの画像解析から、ケース3の加振前後で0.8mm（実物で3.2cm）滑動変形したことがわかった。今回の実験では、加振により被災と言えるような大きな滑動変形は生じなかったと言える。

図-4は、砂層およびケーソンの最大加速度を実験ケース毎に示したものである。入力加速度が小さい場合、砂層の応答加速度は、深さ方向にほぼ同じであるが、入力加速度が大きなケース3、4の場合は、表層付近で局所的に大きくなっている。このように、砂層の応答が深さ方向に大きく変化していなかった理由は、砂層の加速度伝達関数が5Hz付近まで、ほぼ1.0であったためである。すなわち、入力波の主要振動数は前述のように5Hz以下であり、その結果、主要動は特に増幅しなかったということである。ケーソ

表-1

ケースNo.	加振前	加振による
	静的土圧係数	沈下量(実物換算値)
1	0.166	0.07mm (2.8mm)
2	0.169	0.20mm (8.0mm)
3	0.190	0.36mm (1.44cm)
4	0.194	0.29mm (1.16cm)

ンの応答加速度は、加速度レベルが小さい場合、周辺砂層と同じであるが、加速度レベルが大きくなるとケーソンの応答は、ケーソン底面と同じ深さの砂層のそれより小さい。これは、加速度レベルが大きくなることにより、ケーソン直下の砂層に非線形性が現れたためと考えられる。

図-5は、静的土圧に動的土圧を加算して求めた土圧係数と現行の耐震設計で用いられている物部・岡部式の地震時土圧係数（実線）を $\phi=43.5^\circ$ として入力加速度の大きさ毎に比較したものである。更に、図中の点線は、震度法による現行の耐震設計法での震度と地盤最大加速度との関係を重力式岸壁について検討した結果⁴⁾からの補正を行ったものである。なお、現行設計法で算定される土圧係数のうち、増加する土圧係数は震度の向きが海側、減少する土圧係数は震度の向きが陸側の土圧係数を示す。また、震度は便宜上、加速度で表示している。動的土圧係数の最大値は入力加速度とともに増加しているが、増加の割合は現行設計の土圧係数より小さく、直線的に増加している。一方、動的土圧係数の最小値には下限があるように見える。この比較によると、現行設計法は震度0.15程度以上から実験結果をうまく説明できていない。これは、既往の1G場の実験結果と整合している。

図-6は、ケース3（入力最大加速度、212Gal）のケーソンの慣性力（

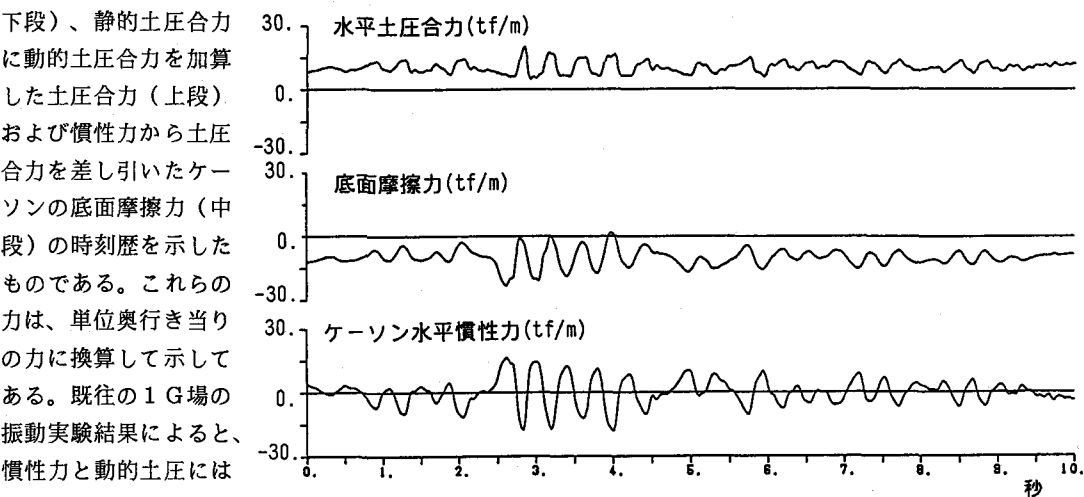


図-6 ケーソンに作用する力の時刻歴（ケース3、主要動部10秒間）

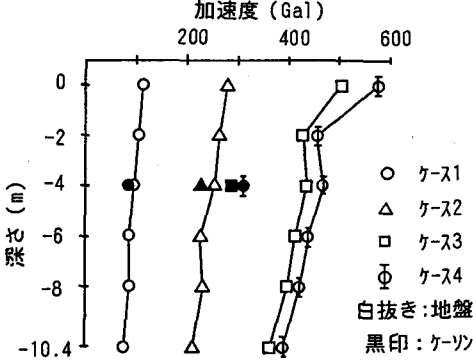


図-4 最大加速度分布

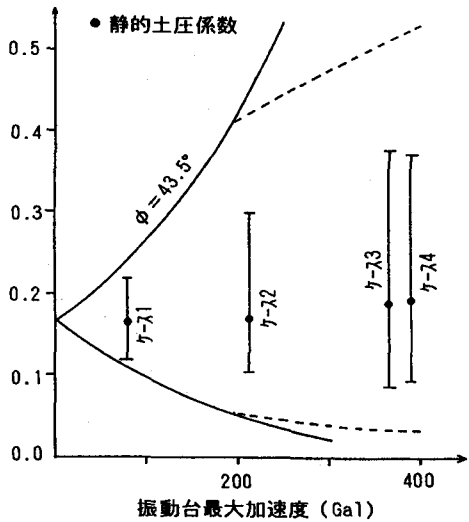


図-5 振動時の土圧係数

実験結果でも両者に同様な位相差を見ることができ
る。すなわち、実物規模でも動的土圧は、必ずしも
ケーソンの地震時安定性に危険な土圧にはならない
ことがわかる。

更に、既往の研究成果では、ケーソンの慣性力の
6～7割をケーソンの底面摩擦力が動的に分担する
ことも示されている。遠心力場でも、同様に慣性力
と動的土圧に位相差がある。そこで、底面摩擦力が
動的に分担する慣性力の割合を算定すると、入力加
速度が小さいケース1が61%、ケース2、3が73%、
ケース4が75%であった。この割合は、1 G場での
模型実験結果とほぼ同じである。このように動的土
圧を直接求めることなく、慣性力から動的な水平外
力を算定できると、ケーソンの設計が簡略化でき、
便利である。

図-7は、動的土圧のフーリエスペクトル（下段）
をケーソン背後の砂層（A-4）の加速度フーリエ
スペクトル（上段）と比較したものである。砂層の
フーリエスペクトルは、入力加速度の大きさに係わ
らず、卓越振動数は変化していない。これは、前述
のように入力波の主要動の卓越振動数の範囲の加速
度伝達関数の値がほぼ1.0で、砂層の応答が線形的で
あったことが考えられる。また、動的土圧のフーリ
エスペクトルの卓越振動数は砂層のそれと一致し、
その形状もほとんど同じである。したがって、今回
の実験の動的土圧は、砂層の応答の影響を強く受けていたことがわかる。

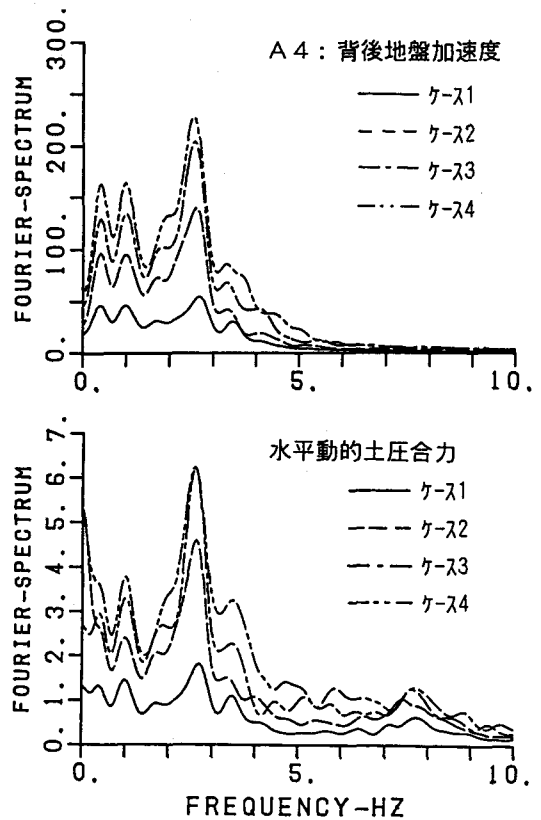


図-7 背後地盤の応答加速度と
動的土圧合力のフーリエスペクトル

4. あとがき

40Gの遠心力場でケーソン・地盤系の模型振動実験を実施し、地盤、ケーソンの加速度、ケーソンに作用する土圧について検討した。その結果、ケーソンの慣性力と動的土圧には位相差があり、動的土圧は必ずしも危険な土圧ではなく、またケーソンの底面がケーソンの慣性力の60～70%を動的摩擦力として分担することなど、1 G場の模型振動実験結果と同様な結果を得た。今回の実験に使用した砂層は、比較的締まった状態で、砂層の応答は線形的であった。今後、砂層の密度を変化させた実験、かつ実物と同じように飽和状態でのケーソン・地盤系の実験を実施していく予定である。

参考文献

- 1) 風間基樹・稲富隆昌：ケーソンに作用する地震時土圧に関する模型振動実験、土木学会論文集、第416号、I-13、pp. 419～428、1990年4月。
- 2) 稲富隆昌・風間基樹・野田節男・土田 肇：港湾技術研究所における遠心力載荷模型振動実験、天然資源の開発利用に関する日米会議、耐風・耐震構造専門部会第21回合同部会会議録、pp. 181～192、1989年5月。
- 3) 風間基樹・稲富隆昌・大塚幸治：遠心力場における振動実験装置の開発、港湾技研資料、No. 607、1988年3月。
- 4) 野田節男・上部達生・千葉忠樹：重力式岸壁の震度と地盤加速度、港研報告、Vol. 14、No. 4、1975年。